

Proyecto FB720

INFORME SOBRE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS MATERIALES

Equipo de Análisis de impacto ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña
Gerardo Wadel*, Pol Alonso y Joan-Lluís Zamora

*Societat Orgànica

Barcelona, diciembre de 2011

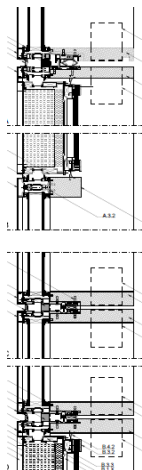
INFORME SOBRE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS MATERIALES

0. Índice

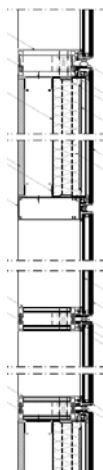
1. Análisis realizado
2. Metodología
3. Análisis de ciclo de vida resumido:
 - 3.1 Extracción y fabricación de materiales, 3.2 Transporte, 3.3 Construcción, 3.4 Mantenimiento, 3.5 Derribo / Desconstrucción, 3.6 Ciclo de vida completo
4. Conclusiones del ACV
5. Análisis de sensibilidad: hipótesis de mejora
6. Relación de este estudio con el análisis térmico-lumínico
7. Anexos: Datos y cálculos de impactos del ciclo de vida

1. Análisis realizado

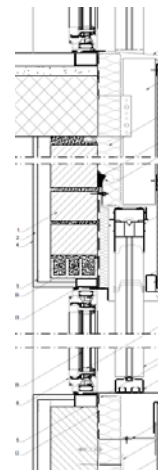
Este documento presenta una síntesis del análisis de ciclo de vida resumido ACV realizado sobre diferentes variantes de un mismo desarrollo de un nuevo muro cortina denominado FB720, cuyas alternativas se basan en distintas combinaciones de materiales (montantes exteriores, aislamiento térmico, cerramientos interiores, etc.), tipos de vidrio (incolores, estacionales, bajo emisivos, etc.), proporciones de la parte transparente del cerramiento (75% y 37%) y separaciones entre ejes de montantes (60 cm y 120 cm). Este análisis pretende determinar el comportamiento ambiental de las distintas alternativas a lo largo de un ciclo de vida de 50 años, así como también detectar las mejores combinaciones posibles o, dicho de otra forma, qué configuración de fachada hace posible la máxima reducción de impacto ambiental. Por otra parte, se establece una comparación de resultados de análisis de ciclo de vida entre distintas alternativas del nuevo muro cortina FB720 y un muro cortina modular estándar MCM, por una parte, y una fachada pesada convencional estándar FPC, por la otra. Tal como se determina en los documentos de metodología del proyecto, el objetivo ambiental del proyecto FB720 es alcanzar la máxima reducción de impacto ambiental, respecto de sí mismo, y situarse por debajo de las dos alternativas de cerramiento de referencia MCM y FPC.



Cerramiento FB720 (planta)



Cerramiento MCM (planta)



Cerramiento FPC (sección)

La evaluación ambiental que aquí se presenta refiere a los impactos ambientales derivados del ciclo de los materiales de la vida útil de un edificio. No obstante el nuevo muro cortina tiene otra dimensión de análisis ambiental, que es su comportamiento térmico y lumínico como piel de los edificios en los que puede actuar como cerramiento exterior, que aunque ha sido realizada por separado y por otro equipo técnico se integra en la parte final de este informe.

2. Metodología

Tal como se ha dicho existen documentos que exponen en forma detallada la metodología empleada en este ACV resumido, que puede sintetizarse de la siguiente manera:

-Unidad funcional: 1 m² de cerramiento con una vida útil de 50 años.

-Fases consideradas: producción de materiales [1], transporte [2], mantenimiento [3], derribo [4] y gestión final de residuos [5].

-Impactos evaluados: peso de los materiales [Kg/m²], consumo de energía [MJ/m²], y emisiones de CO₂ [KgCO₂/m²]. En algunas fases también residuos sólidos [kg/m²], material reciclado o renovable en el inicio del ciclo de vida [Kg/kg], material reciclable o compostable en el final del ciclo de vida [kg/kg] y toxicidad ambiental [ECA Kg/Kg].

-Asunciones y límites del sistema: en [1] todas las operaciones de extracción y transporte de materias primas hasta la fábrica de materiales. El transporte desde éstas hasta la fábrica de muro cortina, así como las operaciones propias de fabricación y montaje de sus componentes. No se incluye la consideración de la intensidad material por unidad de uso. En [2] la utilización de los combustibles empleados por los medios de transporte. No se tendrá en cuenta el ciclo de vida de vehículos ni infraestructuras. En [3] el uso de maquinaria que consuma energía (eléctrica, gasóleo, etc.). No se tendrá en cuenta el gasto energético de la fuerza humana ni tampoco la amortización de medios auxiliares. En [4] operaciones de mantenimiento, sustitución parcial y total en el plazo de 50 años. En [5] el desmontaje del cerramiento hasta alcanzar el nivel de separación de los materiales que componen la solución constructiva y la gestión en los residuos no reciclables.

-Herramientas y bases empleadas: casi todos los cálculos se han realizado con la ayuda de hojas de cálculo estándar y sin la utilización de programas expertos. Las bases de datos sobre materiales han sido BEDEC PR/PCT del ITeC, ICE de la Universidad de Bath, EMPA del Consorcio de Universidades Públicas de Suiza, ELCD de la Unión Europea y en algunos casos ECOINVENT e IVAM mediante cálculos realizados con el programa SIMAPRO (obtenidos a partir de un proyecto de investigación del Centro de Iniciativas de la Edificación Sostenible) así como cálculos propios para la determinación del volumen y la densidad de los materiales que conforman las diferentes soluciones constructivas y de su peso específico. En cuanto a las operaciones de transporte y carga, así como la generación de residuos, el mismo el banco PR/PCT, así como información proporcionada por fabricantes, otros estudios, cálculos y estimaciones propias. En la conversión del consumo de energía (en KWh eléctricos o litros de gasoil) a emisiones de CO₂ fueron tenidos en cuenta los coeficientes de paso establecidos en los procesos de la certificación

energética española. En Material reciclado o renovable y reciclable o compostable, cálculos propios así como información proporcionada por fabricantes o terceras partes.

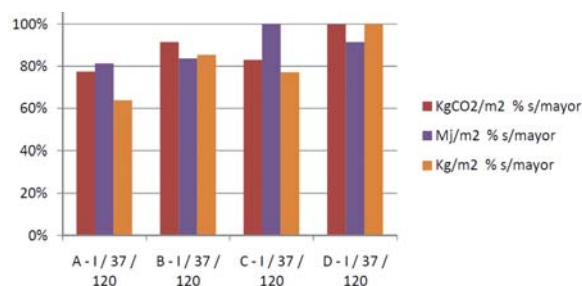
3. Análisis de ciclo de vida resumido

A continuación se presenta una síntesis de la evaluación y resultados de impacto ambiental de las diferentes fases del ciclo de vida de los tres tipos de fachada estudiados (FB720, MCM y FPC), cuya información más detallada se encuentra en los anexos correspondientes a cada etapa.

3.1 Extracción y fabricación de materiales

Teniendo en cuenta las numerosas variantes de fachada FB720 que son producto de la combinación de materiales, tipos de vidrio, proporción de parte transparente y distancias entre montantes, se han seleccionado las cuatro con mejores resultados desde el punto de vista ambiental. Son las conformadas por vidrio normal de control solar [I], 37% de superficie transparente [37], 120 cm entre ejes de montantes [120] y cuatro combinaciones de materiales: madera laminada, lana de oveja, tablero aglomerado, papel kraft [A, materiales naturales renovables], PVC reciclado, fibra textil reciclada, tablero fibra-yeso, EPDM [B, materiales industriales reciclables], madera con polímeros lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft [C, híbrido de materiales naturales e industriales] y hormigón con fibras, lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft [D, híbrido de materiales naturales e industriales]. Las gráficas siguientes presentan los resultados obtenidos en peso, energía y emisiones de CO₂ para estas alternativas, así como una comparación entre ellas, en la que destaca como A/I/37/120 con los impactos ambientales más bajos.

Fachada	Kg/m ²	MJ/m ²	KCO ₂ /m ²
A/I/37/120	53,99	1348,37	98,97
B/I/37/120	72,17	1387,02	116,94
C/I/37/120	65,22	1656,99	106,27
D/I/37/120	84,50	1516,48	127,87



Por otra parte, las alternativas que más impacto ambiental concentran son la C/III/75/60 (madera con polímeros lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft, vidrio de control estacional y bajo emisivo, 75% transparente y montantes cada 60 cm) con 89,66 Kg/m², 2284,01 MJ/m² y 149,16 KgCO₂/m² y la D/III/37/60 (hormigón con fibras, lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft, vidrio de control estacional y bajo emisivo, 37% transparente y montantes cada 60 cm) con 120,81 Kg/m², 2027,01 MJ/m² y 182,39 KgCO₂/m². La diferencia entre las alternativas de impacto más bajo y más alto, producto de cambios en materiales, vidrios, parte transparente y distancia entre montantes, es de hasta el 110% en peso, el 70% en energía y el 80% en emisiones de CO₂.

Respecto de la comparación entre la nueva fachada FB720 y las fachadas de referencia MCM (muro cortina modular) y FPC (pesada convencional), teniendo en cuenta idénticas proporciones de parte vidriada pero no de separación de montantes (ya que en el caso MCM sólo existe el rango de 120 cm), la mejor alternativa FB720 (A/I/37/120) respecto de la MCM muestra una reducción de un 67% en energía y un 81% en emisiones mientras

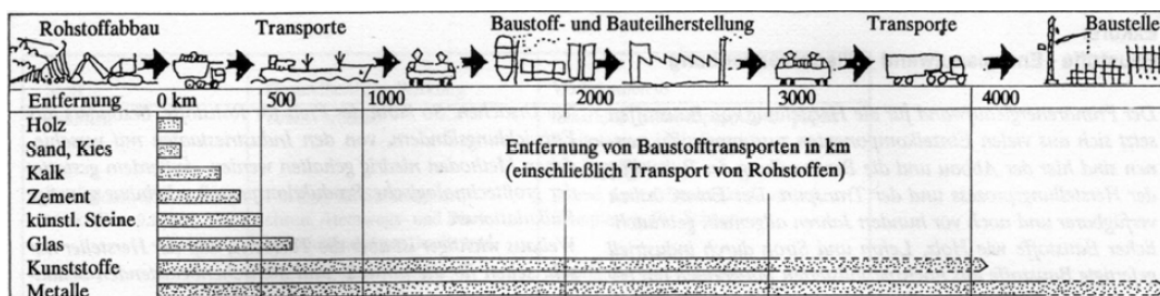
que respecto de la FPC estos valores son de un 42% y un 61% respectivamente. Si en cambio, se considera una alternativa FB720 de impacto ambiental superior (C/III/75/60, por ejemplo), las reducciones se sitúan en 45% energía y 72% en emisiones respecto de la fachada MCM y en 2% en energía y 42% en emisiones respecto de la fachada FPC.

Fachada	Kg/m ² %		MJ/m ² %		KCO ₂ /m ² %	
FB720 A/I/37/120	53,99	100%	1.348,37	100%	98,97	100%
MCM I/37/120	59,21	110%	4.111,32	305%	525,94	531%
FPC 37/120/C	121,82	226%	2.327,18	173%	255,49	258%
FB720 C/III/75/60	89,66	166%	2.284,01	169%	149,16	151%

3.2 Transporte

En esta síntesis se presentan los resultados de los cálculos realizados para las fachadas FB720, MCM y FPC con localización de obra en Madrid, por tratarse de una ciudad central en el territorio español, aunque también se calcularon otros emplazamientos.

En el caso FB720 se tuvo en cuenta que el taller de prefabricación se encuentra en Olot, Girona. Para el resto de localizaciones (fábricas de materiales, almacenes, distribuidores), habida cuenta de la dificultad de su determinarlas para todos los materiales intervinientes (la selección de un proveedor u otro suele depender de cuestiones tales como el precio, las condiciones de pago, la disponibilidad, la logística de transporte, etc., y no tanto de la optimización de los movimientos) se tuvieron en cuenta las distancias habituales de transporte de materiales de construcción que constan en el libro *Wege zum Gesunden Bauen*, Holger König, 1985, Ökobuch, Freiburg, que se sintetizan en el siguiente gráfico.



De acuerdo a los distintos materiales que intervienen en las distintas fachadas cambian las distancias, los pesos, los embalajes, la densidad de transporte, etc. Por otra parte, los medios de transporte considerados, con alguna excepción, son camiones de 16 toneladas con ocupación de carga estimada para cada recorrido (fábrica-almacén, almacén-obra, fábrica-taller de fachadas, taller de fachadas-obra, etc.) de acuerdo a la experiencia del sector y las consultas realizadas.

Los resultados de los cálculos de consumo de combustible y su paso a energía primaria y emisiones de CO₂ para cada fachada pueden verse en la siguiente tabla.

	GAS OIL Litros / m ²	ENERGIA Mj / m ²	EMISIONES Kg CO ₂ / m ²
FB720 - A	2,44	102,71	8,19
FB720 - B	3,74	134,97	11,18
FB720 - C	2,50	105,50	8,41
FB720 - D	2,58	108,56	8,65
MCM	2,76	116,19	9,26
FPC	2,19	92,44	7,37

A diferencia de lo que ocurría en la fase anterior, donde las diferencias eran significativas, la energía y emisiones de transporte varían en menor grado tanto entre distintas versiones de fachadas FB720 como en las fachadas MCM y FPC. Las alternativas tipo A de FB720, basadas en materiales naturales, ligeros y locales, tienen menor impacto ambiental entre los sistemas prefabricados. No obstante, los menores impactos se registran en el sistema FPC, a causa de la gran dispersión geográfica que presentan las localizaciones de fabricantes de materiales, taller y obra en los sistemas prefabricados.

3.3 Construcción

En esta fase, en que se calculan los impactos ambientales de la maquinaria utilizada en obra, los materiales de embalaje y la gestión de los residuos de los mismos y de la construcción, ha sido necesario considerar que las fachadas FB720, MCM y FPC se instalan un edificio imaginario de 40 x 60 m en planta, de planta baja más 8 plantas superiores y con un interejo de forjados de 3,50 m. Ello ha hecho posible considerar todos los medios auxiliares de obra necesarios para descargar, subir, acopiar, instalar, remover residuos, etc. en cada uno de los escenarios considerados. Las fachadas FB720 y MCM, por ser ambas prefabricadas y modulares, presentan una situación casi idéntica y por tanto registran los mismos impactos. En el caso de la fachada FPC, que cuya construcción tiene lugar mayoritariamente en obra, el impacto ambiental ha sido calculado a partir de las diferentes partidas de obra que la conforman.

Fachada	Localización Concepto	MJ/m ² %	KCO ₂ /m ² %	m3/m ²
FB720 y MCM	<u>Prefabricación</u> taller fachadista	2,94	0,53	
	<u>Obra</u> maquinaria eléctrica	2,41	0,43	
	maquinaria a gas-oil	4,10	0,33	
	materiales de embalaje	4,41	0,53	
	gestión de residuos	0,28	0,02	
	total	14,14 100%	1,84 100%	0,00
FPC 37/120/C	<u>Obra</u> maquinaria eléctrica	33,58	6,05	
	maquinaria a gas-oil	40,08	3,20	
	materiales de embalaje	14,00	1,68	
	gestión de residuos	0,11	0,01	0,14
	total	87,77 621%	10,94 594%	0,14

Los resultados expuestos en el cuadro síntesis anterior permiten establecer grandes diferencias de impacto entre las fachadas prefabricadas y la fachada de construcción in-situ: tanto en consumo energético como en emisiones de CO₂ el primer caso registra valores hasta seis veces inferiores que los del segundo. Respecto de los residuos sólidos, la generación es tan baja en los sistemas prefabricados, respecto de la construcción in-situ, que los valores de los primeros no alcanzan a ser reflejados en el cómputo.

3.4 Mantenimiento

Esta es la fase con mayor duración a lo largo del ciclo de vida, establecida en 50 años, a por ser el período de tiempo que predomina en este tipo de estudios y que por tanto permite la comparación entre ellos, a pesar de que se ha considerado que la vida útil de un muro cortina estándar ronda los 35 años. Esta diferencia entre la vida útil teórica y real hace que, a efectos de este estudio, deba considerarse una primera etapa desde la construcción y hasta los 35 años en los que se realizan trabajos de pintado de paramentos interiores en forma periódica (cada 5 años) y resellado de juntas de estanqueidad (a los 20 años) en todas las fachadas. Y una segunda etapa desde los 35 hasta los 50 años, en que las fachadas prefabricadas modulares FB720 (A/I/37/120) y MCM (I/37/120) son desmontadas, recuperados algunos de sus materiales cuando es posible, y sustituidas por otras. En la fachada construida in-situ FPC, al llegar también a los 35 años de vida, se ha previsto la sustitución del revestimiento exterior ventilado, la carpintería y la parte afectada por estas operaciones en el cerramiento interior. El cómputo de impactos, con estas consideraciones, se expresa en la tabla siguiente.

Fachada	Concepto	MJ/m ² %	KCO ₂ /m ² %	Kg/m ² %
FB720 (A/I/37/120)	mantenimiento de 0 a 35 años	25,20	1,28	0,00
	reposición de 35 a 50 años	677,62	60,36	22,36
	total	702,82 100%	61,64 100%	22,36 100%
MCM (I/37/120)	mantenimiento de 0 a 35 años	25,20	1,28	0,00
	reposición de 35 a 50 años	2.399,90	289,01	41,75
	total	2.425,10 345%	290,29 471%	41,75 187%
FPC 37/120/C	mantenimiento de 0 a 35 años	51,31	7,57	0,00
	reposición de 35 a 50 años	1.410,00	154,81	39,76
	total	1.461,31 208%	162,38 263%	39,76 178%

Tal como puede comprobarse, existe una gran disparidad en los impactos de consumo energético, emisiones de CO₂ y residuos sólidos entre las fachadas prefabricadas FB720 y MCM, especialmente en la sub-fase que va entre los 35 y 50 años. Porque es allí cuando el cerramiento debe desmontarse y reponerse, convirtiéndose en residuos muchos materiales que podrían reutilizarse o reciclarse, sobre todo en el segundo caso. La diferencia entre ambas fachadas prefabricadas es tan grande, siendo entre 1,9 y 3,5 veces superior la MCM según el impacto de que se trate, que la fachada de construcción in-situ FPC se convierte en la segunda menos impactante, aunque respecto de la FB720 sus valores sean entre 1,8 y 2,6 veces superiores según el indicador que se mire.

3.5 Derribo / Desconstrucción

En este período se contemplan las operaciones de desmontaje, en las fachadas prefabricadas modulares FB720 y MCM, y de derribo, en la fachada construida in-situ FPC. Los cálculos, que incluyen la gestión de residuos, se sintetizan en la siguiente tabla.

Fachada	Concepto	MJ/m ² %	KCO ₂ /m ² %	Kg/m ² %
FB720 (A/I/37/120)	desmontaje y retirada	9,27	0,67	
	centro de reciclaje	2,94	0,53	
	gestión de residuos	0,15	0,39	9,38
	total	12,36 100%	1,59 100%	9,38 100%
MCM (I/37/120)	desmontaje y retirada	9,27	0,67	
	centro de reciclaje	2,94	0,53	
	gestión de residuos	4,48	1,60	31,24
	total	16,69 135%	2,80 176%	31,24 333%
FPC 37/120/C	desmontaje y retirada	33,95	6,59	
	centro de reciclaje	0,00	0,00	
	gestión de residuos	1,72	4,61	109,80
	total	35,67 289%	11,20 705%	109,80 1171%

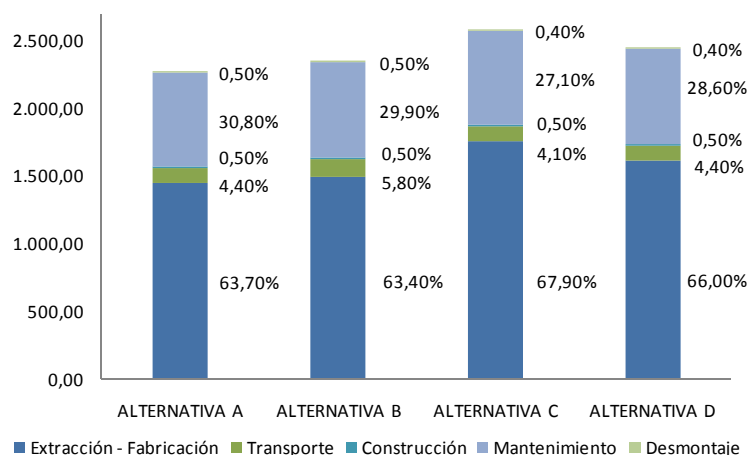
También aquí, como en la fase anterior, existe una gran disparidad en los impactos de consumo energético, emisiones de CO₂ y residuos sólidos entre las fachadas prefabricadas FB720 y MCM, especialmente en la sub-fase de gestión de residuos. Porque es allí cuando, en el caso MCM, muchos materiales que podrían reutilizarse o reciclarse se convierten en residuos, extendiéndose su impacto ambiental más allá del desmontaje, en operaciones de gestión final de los mismos. Y ello actúa como una penalización, ya que en el caso FB720 los materiales reutilizables o reciclables acaban su contabilización de impactos cuando los paneles son desmontados y sus componentes comienzan un nuevo ciclo de vida, de modo que sus impactos no repercuten sobre el que ya ha acabado. La diferencia entre ambas fachadas prefabricadas es grande, entre 1,3 y 3,3 veces superior la MCM según el impacto de que se trate. La fachada de construcción in-situ FPC es la más impactante de todas, especialmente porque el coste energético de demoler es muy superior al de desconstruir y porque genera mayores cantidades de residuos no reutilizables ni reciclables. Respecto de la fachada FB720 sus valores de impacto son entre 2,9 y 11 veces superiores, según el indicador que se mire.

3.6 Ciclo de vida completo

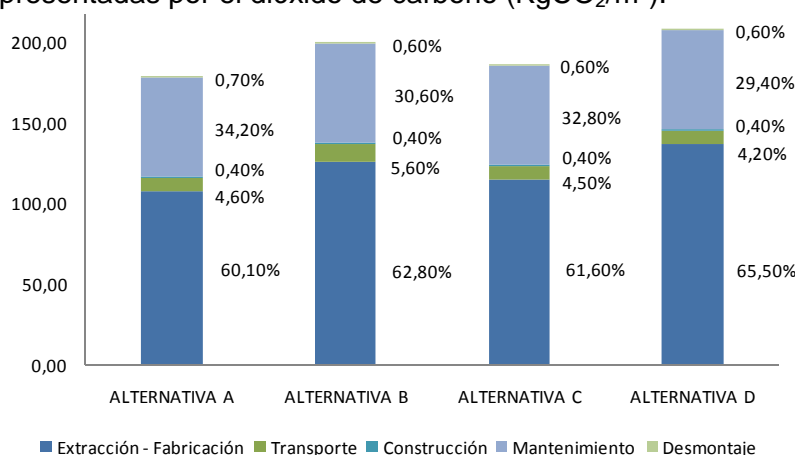
La suma de todas las fases del ciclo de vida permite obtener una visión global del comportamiento de cada sistema de fachada, mediante la consideración de los valores totales, así como también detectar en qué fases se producen las principales asimetrías. A continuación se presentan los resultados totales comparando las cuatro alternativas de la fachada FB720: madera laminada, lana de oveja, tablero aglomerado, papel kraft [A], PVC reciclado, fibra textil reciclada, tablero fibra-yeso, EPDM [B], madera con polímeros, lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft [C] y hormigón con fibras, lana de oveja, tablero aglomerado, papel Kraft [D] con vidrios tipo I (normal de control solar), 37% de parte transparente y separación entre montantes de 60 cm.

FB720 (I/37/120)	EXTRAC. - FABRIC.		TRANSPORTE		CONSTRUCCIÓN		MANTENIMIENTO		DESMONTAJE		TOTAL	
	Mj / m ²	KgCO ₂ / m ²	Mj / m ²	KgCO ₂ / m ²	Mj / m ²	KgCO ₂ / m ²	Mj / m ²	KgCO ₂ / m ²	Mj / m ²	KgCO ₂ / m ²	Mj / m ²	KgCO ₂ / m ²
ALTERNATIVA A	1.447,50	107,41	102,71	8,19	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.273,08	178,64
ALTERNATIVA B	1.486,15	125,38	134,97	11,18	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.343,99	199,60
ALTERNATIVA C	1.756,12	114,71	105,50	8,41	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.584,49	186,16
ALTERNATIVA D	1.615,61	136,31	108,56	8,65	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.447,04	208,00

Esta información se presenta también en forma de gráfica de energía (MJ/m²), donde se observan mejor los resultados finales así como las diferencias entre fases.



La misma comparación puede establecerse en términos en emisiones de efecto invernadero representadas por el dióxido de carbono (KgCO_2/m^2).

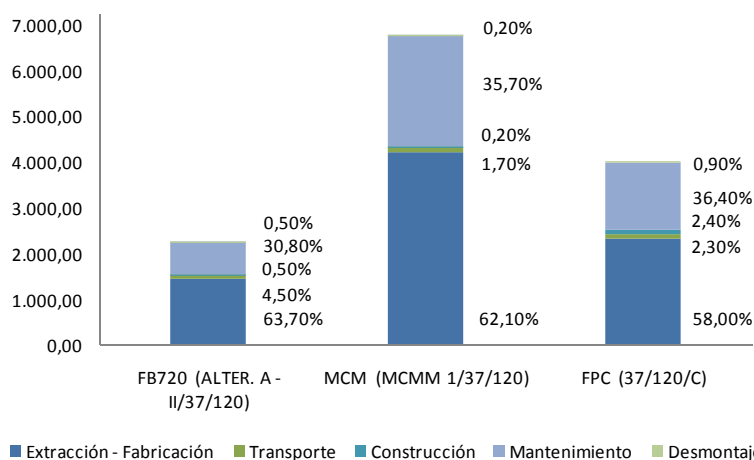


Se observa que la alternativa A/I/37/120, formada principalmente por materiales naturales renovables, tiene el mejor comportamiento ambiental a lo largo del ciclo de vida (ya ocurriría esto en la fase de extracción y fabricación de materiales). También puede comprobarse que la mayor parte del impacto ambiental se concentra en las fases de extracción y fabricación de materiales (entre un 60% y un 66%) y mantenimiento (entre un 27% y un 34%).

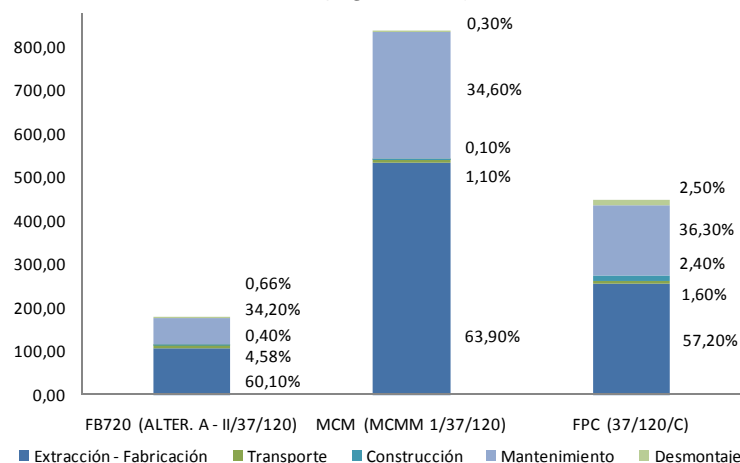
A continuación se presenta una comparación entre la fachada FB720 de mejor desempeño ambiental y las fachadas de referencia MCM (convencional modular) y FPC (pesada convencional).

FACHADAS	EXTRAC. - FABRIC.		TRANSPORTE		CONSTRUCCIÓN		MANTENIMIENTO		DESMONTAJE		TOTAL	
	Mj / m²	KgCO ₂ / m²	Mj / m²	KgCO ₂ / m²	Mj / m²	KgCO ₂ / m²	Mj / m²	KgCO ₂ / m²	Mj / m²	KgCO ₂ / m²	Mj / m²	KgCO ₂ / m²
FB720 (A - I/37/120)	1.447,50	107,41	102,71	8,19	11,99	0,75	699,89	61,11	10,99	1,18	2.273,08	178,64
MCM (MCM 1/37/120)	4.210,74	534,40	116,19	9,26	11,99	0,75	2.422,17	289,76	15,07	2,38	6.776,16	836,55
FPC (37/120/C)	2.327,18	255,49	92,44	7,37	94,52	10,52	1.461,31	162,38	36,27	11,25	4.011,72	447,01

Como en el caso anterior, la información presentada en forma de gráficos de barras permite observar mejor los resultados finales de cada caso, así como sus fases. En primer lugar se presenta una comparación en energía (MJ/m^2).



Y en segundo lugar se presenta una comparación en emisiones de efecto invernadero representadas por el dióxido de carbono (KgCO_2/m^2).



Tal como ha venido ocurriendo a lo largo de las cinco fases estudiadas, a nivel de ciclo de vida en cuanto a energía y emisiones de CO_2 también se evidencian diferencias profundas entre los impactos ambientales de las fachadas FB720 (la menor), MCM (la mayor) y FPC (la intermedia). La fachada FB720 consigue una reducción de impactos ambientales, al menos en los indicadores de consumo de energía y emisiones de CO_2 aquí presentados, del orden de 2 a 1 cuando se la compara con la FPC y de 3 a 1 cuando se la compara con la MCM. La gran repercusión de las fases de extracción y fabricación de materiales, en primer lugar, y de mantenimiento, en segundo lugar, se mantiene cuando se comparan sistemas de fachadas diferentes, tanto sean prefabricados como contruidos in-situ.

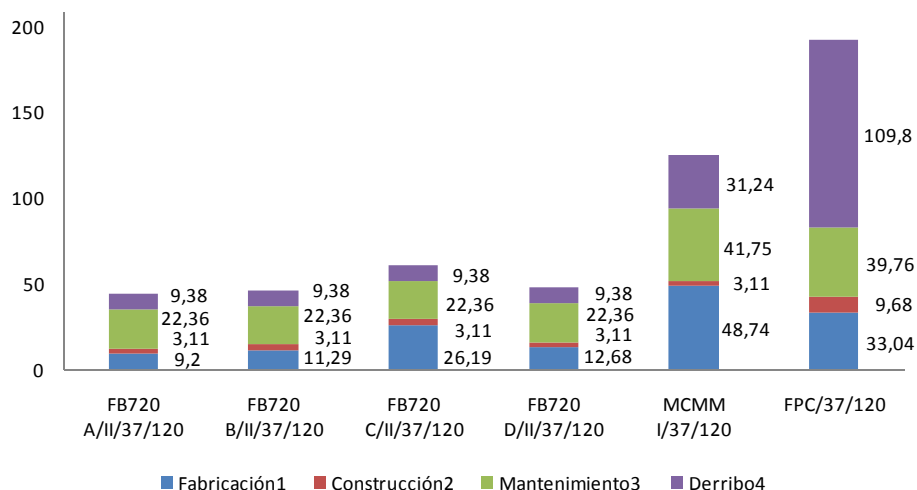
Por lo que respecta a residuos sólidos (aquellos materiales que no admiten ni reciclaje ni compostaje y que por tanto tienen destino final en vertedero), también se ha realizado una comparación entre sistemas. Se han tenido en cuenta las cuatro variantes de la fachada FB720 así como las correspondientes a MCM y FPC ya consideradas en la evaluación de energía y emisiones de CO_2 . Las fases tenidas en cuenta son todas, a excepción de la de transporte que es cuando no se producen residuos sólidos (al menos no causados en forma directa por el uso del combustible de los camiones considerados) sino principalmente emisiones a la atmósfera. La tabla siguiente expone los valores de residuos generados para cada sistema y fase, así como el total de ciclo de vida, en Kg/m^2 .

Es importante tener en cuenta que, habida cuenta de la falta de disposición de datos específicos sobre generación de residuos en todas las fases y sistemas considerados, los valores han sido calculados a partir de información de bases de datos (IVAM, BEDEC, etc.), fabricantes, bibliografía, materiales asimilables y estimaciones propias. Los resultados, por tanto, no deben considerarse exactos sino representativos de tendencias.

Fachada	Fabricación ¹	Construcción ²	Mantenimiento ³	Derribo ⁴	Total	%
FB720 A/I/37/120	9,2	3,11	22,36	9,38	44,05	100%
FB720 B/I/37/120	11,29	3,11	22,36	9,38	46,14	105%
FB720 C/I/37/120	26,19	3,11	22,36	9,38	61,04	139%
FB720 D/I/37/120	12,68	3,11	22,36	9,38	47,53	108%
MCM I/37/120	48,74	3,11	41,75	31,24	124,84	283%
FPC/37/120	33,04	9,68	39,76	109,8	192,28	437%

¹Residuos de fabricación de materiales básicos, ²Residuos de embalajes (FB720, MCM y FPC) y sobrantes de construcción (FPC), ³Residuos no reciclables producto de la reposición parcial del cerramiento a los 35 años, ⁴Residuos no reciclables producto de la desconstrucción o derribo del cerramiento a los 50 años.

La misma información, pero en forma de gráfica, da una idea más clara de la repercusión de cada fase en el total de residuos de cada caso, así como también de la comparación relativa entre los distintos sistemas de fachada. Los valores más bajos, con una variación de hasta un 40% debida principalmente a la fase de producción de materiales, corresponden a los diferentes tipos de la fachada FB720. El cerramiento tipo MCM se sitúa en un segundo nivel, doblando en impacto a la fachada FB720 que más residuos genera. El nivel de superior, correspondiente al mayor impacto del conjunto, lo ocupa la fachada FPC que cuadruplica la media de la FB720 y supera por un 50% a la MCM.



4. Conclusiones del ACV

La aplicación de las estrategias ambientales de los materiales, definidas en la metodología del proyecto FB720 en el diseño de sus diferentes alternativas, ha permitido una reducción significativa de los de los impactos ambientales a lo largo de un ciclo de vida de 50 años, tanto respecto de sí misma como en comparación con las fachadas de referencia MCM (convencional modular) y FPC (pesada convencional). Aunque las mejoras se verifican también en el indicador de residuos sólidos, la evaluación realizada

con los indicadores de energía y emisiones de CO₂ resulta más adecuada para analizar el ciclo de vida completo porque abarca la totalidad de las fases.

Las estrategias ambientales de los materiales empleadas son las siguientes:

- Reducción de la cantidad de material por unidad de servicio.
- Sustitución de los materiales y sistemas con mayor impacto asociado.
- Utilización de materiales reciclados, si son industriales, o renovables, si son naturales.
- Potenciación de la rehabilitación (de materiales y componentes).
- Minimización de generación de residuos y gestión de los mismos para su reciclaje.
- Potenciación de la durabilidad y del bajo mantenimiento.
- Utilización de técnicas y materiales locales.

Las mejoras ambientales alcanzadas mediante esas estrategias son las siguientes:

-Extracción y fabricación de materiales: se confirma que la utilización de materiales naturales, con baja intensidad de procesos industriales agregados, es la opción de que menores impactos supone. Por otra parte, hay factores como la separación de montantes (cuanto más separados mejor) y la relación lleno/vacío (cuanto más alta mejor) que resultan clave para un resultado ambiental óptimo. En cuanto a los materiales comunes a todas las alternativas FB720 que concentran el impacto ambiental, aún en las mejores opciones y teniendo en cuenta que las cantidades empleadas son significativamente menores que en las fachadas convencionales, éstos siguen siendo el aluminio (aún siendo 100% reciclado), el vidrio y los sintéticos (juntas, intercalarios entre vidrios, etc.).

-Transporte: los materiales, ya sea en estado primario o bien formando parte de módulos de fachada, se desplazan a lo largo de grandes distancias y en ocasiones hasta pueden repetir algunos recorridos. Por ello estudiar los flujos de materiales considerando la localización de los talleres de prefabricación de fachadas, respecto de la ubicación de los proveedores de materiales y el emplazamiento de las obras resulta clave. Otro aspecto de gran importancia es la optimización de la capacidad de carga del medio de transporte, que en los recorridos entre almacén y obra no siempre se colmata. Por último, cabe considerar la posibilidad de utilizar medios más eficientes que el camión, teniendo en cuenta para ello la relación kg transportado/energía consumida, como por ejemplo el tren.

-Construcción: en esta fase es cuando más evidentes se hacen las diferencias de impactos entre sistemas prefabricados y sistemas in-situ. Ello se debe a que en los primeros se concentran y hacen eficientes muchas operaciones que implican un menor uso de maquinaria tanto en fábrica como en obra, un menor consumo directo de materiales (lo que no quiere decir que su requerimiento total contado desde la extracción de materias primas también lo sea) y una menor generación de residuos que, además, en taller pueden ser clasificados con mayor facilidad y, en consecuencia, reciclarse en mayor proporción. Con todo, cabe señalar que los materiales de embalajes (que se convierten en residuos nada más llegar a obra) representan una parte importante del coste energético y emisor de los sistemas constructivos: hasta un 30% y un 20% del total para los sistemas prefabricados FB720 y MCM e in-situ FPC respectivamente.

-Mantenimiento: En esta fase de 50 años de duración que comprende unos 35 primeros años de mantenimiento y unos segundos 15 años, cuando se han cumplido los anteriores, en que los cerramientos son sustituidos, las diferencias entre los distintos sistemas de

fachada vuelven a ser notables. Pero, a diferencia de lo que ocurre en otras fases, en que los rangos de los valores de impacto permiten agrupar las opciones prefabricadas FB720 y MCM por una parte y la opción in-situ FPC por la otra, el orden según el mejor comportamiento ambiental aquí es FB720, FPC y MCM con saltos importantes entre las posiciones primera y segunda (incrementos de impactos entre 1,8 y 2,6 veces) y primera y tercera (incrementos de impactos entre 1,9 y 3,5 veces). Y ello se debe a las muy diferentes estrategias materiales que cada una de las opciones prefabricadas sigue: materiales naturales renovables e industriales reciclados así como separables y recuperables, en caso FB720, y materiales industriales poco reciclados y frecuentemente no separables ni recuperables, en el caso MCM. Tales condiciones hacen que la reposición del cerramiento a los 35 años, en el segundo caso, sea casi idéntica a la construcción del muro cortina por vez primera.

-Demolición/desconstrucción: Además de la diferencia de trabajo mecánico necesario para las operaciones de derribo y desmontaje, mucho más intensiva en el primer caso por el uso de fuerza de golpe y arranque así como de equipos auxiliares de obra para mover máquinas, personal y residuos, cabe apuntar que cada uno de los sistemas presenta diferencias respecto de la cantidad de residuos que se generan en el final de ciclo de vida. Mientras que el desmontaje de la fachada FB720 permite separar materiales reutilizables o reciclables, porque ha sido concebida a partir de esta premisa entre otras, la desconstrucción de la fachada MCM y la demolición de la fachada FPC no dan lugar al mismo escenario de reaprovechamiento de recursos, ya que no han sido diseñadas para ello, de forma que en ambos casos caben operaciones de carga, transporte y gestión final de residuos que elevan sus impactos respecto del caso FB720.

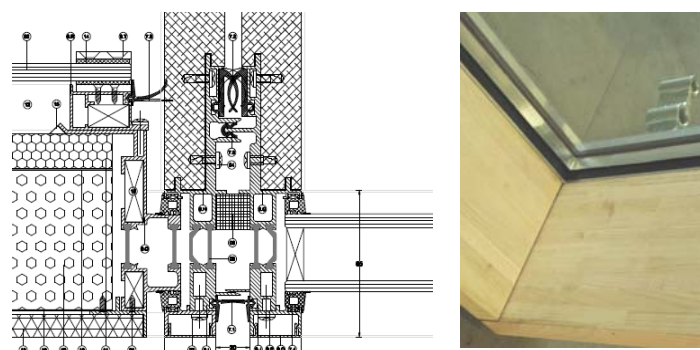
La visión global de ciclo de vida permite comprobar que, tal como muchos estudios ya lo señalan, la industrialización en sí misma no supone ventajas ambientales (la fachada FPC tiene un impacto global menor que la MCM). Pero cuando el diseño de la solución constructiva lleva implícita la gestión de los recursos para el cierre del ciclo de los materiales, esto es dejar de extraer materias primas no renovables y dejar de producir recursos que no reciclables (como en el caso FB720), la cuestión cambia significativamente: la industrialización sí que permite reducir impactos en forma significativa respecto de la construcción convencional.

5. Análisis de sensibilidad: hipótesis de mejora

Como parte del proceso de desarrollo de proyecto de las variantes constructivas de la fachada FB720 se estudiaron diversas opciones de mejora, de reducción de impacto ambiental, aplicables en cada etapa del ciclo de vida. Algunas de ellas, pese a su interés ambiental, finalmente no fueron incorporadas al diseño y producción del cerramiento debido a que presentaban dificultades técnicas (por ejemplo, sustitución de materiales que hubieran necesitado del desarrollo de nuevas matrices de fabricación de otros ya empleados), económicas (por ejemplo, rediseño de producto y proceso de fabricación de un componente constructivo estándar que hubiera supuesto un gran gasto) o de orden práctico (por ejemplo, localización de las plantas de fabricación de materiales o productos y del propio taller de fabricación del muro cortina). A continuación, siguiendo el orden de las fases del ciclo de vida, se presentan cinco alternativas de reducción de impacto

ambiental (energía, emisiones de CO₂, materiales, residuos, etc.) aunque valoradas en forma simplificada mediante el indicador de consumo de energía. Finalmente se valora la repercusión que supondría la incorporación de todas ellas en el sistema FB720.

Fase de extracción-fabricación de materiales: cambio de algunos de los perfiles de aluminio por listones de madera laminada. El sentido de esta propuesta de mejora es reducir energía, emisiones y residuos de producción de materiales, dado que el aluminio 100% reciclado empleado aún presenta mayores niveles de impacto que la madera laminada. Redefiniendo el detalle constructivo que aparece abajo a la derecha (en planta) y tomando como hipótesis la configuración de cerramiento A/II/37/120 se plantea la sustitución de hasta 2,2 kg/m² de aluminio por 3,07 Kg/m² de madera laminada.



Contando estos cambios y respecto de la configuración original la reducción de energía de producción de los materiales, el ahorro que se consigue es de unos 65 MJ/m². Representa un 4,5% de los 1447,5 MJ/m² que surgen de contar el consumo energético de todos los materiales de la configuración original de esta fachada. Puede parecer poco significativo, pero representa más de seis veces la energía de construcción o desmontaje de la fachada (entre 11 y 12 MJ/m²).

Fase de transporte: situar el taller de fabricación de fachadas lo más próximo posible a áreas de grandes ciudades que presenten una demanda potencial de instalación de muro cortina, tanto en obra nueva como en sustitución. Con esta medida se persigue alcanzar una reducción de consumo de combustibles utilizados por los camiones que se desplazan entre fábrica y obra, disminuyendo tanto la energía como emisiones de CO₂ asociadas.



Se ha considerado una disminución de la distancia considerada en el estudio (750 Km desde Olot, donde se encuentra el taller de fabricación de fachadas, hasta Madrid, que es una de las localizaciones de las hipotéticas obras a atender) del orden de 10 a 1, es decir,

reducir el trayecto anterior a unos 75 km (para ello el taller de fabricación se ha situado hipotéticamente en Toledo, manteniendo la obra en Madrid).

La situación inicial suponía un consumo de gasoil de $2,44 \text{ litros/m}^2$, que representan $102,71 \text{ MJ/m}^2$. La disminución de 751 a 75 Km en el trayecto taller-obra supone un consumo de gasoil de $0,74 \text{ litros/m}^2$, que representa $31,31 \text{ MJ/m}^2$. La reducción conseguida es de 71,40 MJ, que es el 69,5% del total de la fase de transporte.

Fase de construcción: Materiales de embalaje 100% reciclables. En la puesta en obra del muro cortina modular FB720, casi no se generan residuos porque las operaciones constructivas se limitan a anclar el cerramiento a la estructura. Los residuos principales son, por tanto, los materiales empleados en el embalaje de los paquetes de paneles de fachada. Estos materiales suponen un doble impacto: el de su producción (extracción-fabricación) y el de su gestión como residuos (separación, carga, transporte y tratamiento final). Con esta medida se plantea reducir el consumo de materiales de embalaje, gracias a su reutilización en el mayor número de ciclos posible, y eliminar la gestión de los residuos (gracias a que una vez acabada su vida útil se reciclarían).



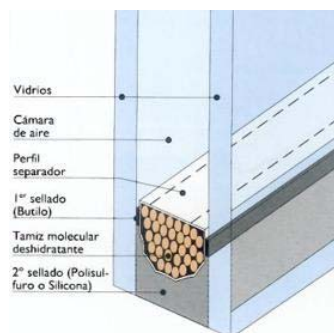
En términos de consumo de energía, la producción de los materiales de embalaje utilizados en el transporte de los módulos de fachada (principalmente polietileno, espuma sintética, madera y acero) representan $3,78 \text{ MJ/m}^2$. La gestión de los residuos generados una vez que los embalajes son retirados en obra, incluyendo las operaciones que tienen en el emplazamiento y en los centros de deposición final es $0,51 \text{ MJ/m}^2$. El total es de $4,29 \text{ MJ/m}^2$. El ahorro de energía que supondría utilizar un sistema de embalajes reciclable se estima en un 80%, teniendo en cuenta que los materiales admitan un mínimo de cinco usos y que sean completamente reciclables (con lo que se evita la gestión final pero no la carga y transporte). El consumo de energía en esta fase, bajo la hipótesis anterior, sería de $0,78 \text{ MJ/m}^2$.

Fase de mantenimiento: aumentar la vida útil de toda la fachada de 35 a 50 años. En la hipótesis de este estudio se había tenido en cuenta, a partir de los conocimientos existentes en el mercado sobre la durabilidad de los muros cortina existentes, el reemplazo casi total de los cerramientos a los 35 años. Los muros cortina construidos en los años '70, cuyos fallos principales son pérdidas de estanqueidad por deterioro de las juntas y unas escasas prestaciones de aislamiento térmico y protección solar, dan prueba de ello. No obstante se desconoce la durabilidad de los muros cortina de reciente fabricación, que podría ser superior si los materiales elásticos de las juntas demostraran una vida útil superior. La hipótesis estudiada es su equiparación con la del resto de materiales, es decir una durabilidad global de 50 años que no suponga ningún reemplazo.



La sustitución de la fachada FB720 (remoción, carga, transporte e idénticas operaciones en la fachada nueva), contando que una cierta cantidad de los materiales se recuperan y que sólo se repercute la parte proporcional a 15 años de vida útil (desde el año 35 hasta el año 50 en este estudio), supone $442,91 \text{ MJ/m}^2$. Si, en cambio, se consiguiera ampliar la vida útil de la fachada hasta 50 años (que se supone se alcanza en todos los materiales excepto en las juntas y sellados, sobre los que no hay suficiente consenso), se podría contar que se hace un resellado con siliconas a los 15 años, ya considerado en el cálculo, y a los 30 años. Estas operaciones tienen una repercusión mucho menor: apenas $0,027 \text{ MJ/m}^2$ contando la aportación de material de sellado y los medios auxiliares de obra para aplicarlo en altura. El ahorro alcanza prácticamente el 100% del impacto de la fase.

Desconstrucción: suponer unos que los paneles de vidrio cámara son completamente desmontables y reciclables. La gestión de residuos del vidrio cámara, vidrio laminado y vidrios con impresiones, tintas, deposiciones, serigrafías, etc., es compleja. La composición y el tipo de juntas entre los distintos elementos que conforman los paneles, adheridas y por tanto no reversibles, impide recuperar los materiales originales en un estado tal que permita un reciclaje técnico y económicamente sencillo. Como resultado de ello, gran parte del vidrio utilizado en construcción no se recicla sino que se infracicla (se tritura y se mezcla como carga en compuestos de calidad inferior). Lo que se persigue con esta medida es evitar un doble impacto: el de la gestión, vertido de residuos o infraciclado (que se evitarían con el desmontaje y separación selectiva) y la producción de nuevos materiales (que se evitaría con si se pudieran reutilizar o reciclar los ya existentes).



El impacto ambiental de la fase de desconstrucción, aún teniendo en cuenta que la mayoría de los materiales se recuperan para ser reutilizados o reciclados, es de $10,99 \text{ MJ/m}^2$. Dejando a un lado las operaciones de desmontaje, carga y transporte a un hipotético centro de reciclaje donde se desarmen los paneles, el impacto que se podría evitar con esta medida es de $0,15 \text{ MJ/m}^2$ de gestión de residuos en vertedero (juntas y

paneles de vidrio cámara) y 0,25 MJ/m² de transporte desde donde se desmonta el módulo de fachada hasta vertedero. 0,4 MJ/m² en total. Pero además se ahorrarían 204,5 MJ/m² que se recuperarían de los vidrios reutilizables (un 50% del total), porque de esta forma se evitaría la producción de material nuevo.

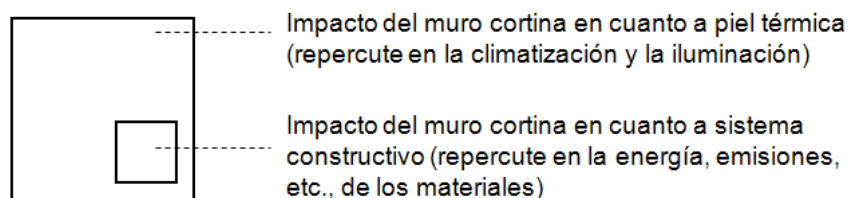
Resultados en el ciclo de vida: la repercusión de los diferentes ahorros que podrían alcanzarse con la incorporación de las medidas planteadas a la fachada FB720 puede observarse en el siguiente cuadro (la repercusión porcentual está hecha sobre el total de consumo energético del ciclo de vida, que es 2.278,08 MJ/m²).

Medida de mejora	Ahorro (MJ/m ²)	% ahorro s/total
1. Sustitución de perfiles de aluminio por madera	65,00	2,85%
2. Taller de fachada próximo a la obra (75 Km)	71,40	3,13%
3. Embalaje reutilizable y materiales reciclables	3,43	0,15%
4. Vida útil de las juntas extendidas a 50 años	442,91	19,44%
5. Paneles de vidrio totalmente desmontables	204,90	8,99%
Totales	787,64	34,57%

Aunque las medidas propuestas suponen grados de dificultad de puesta en práctica muy diferentes (no es lo mismo relocalizar un taller de fabricación de fachadas que desarrollar nuevos embalajes), se constata que existen oportunidades de mejora de gran repercusión y que, combinadas, pueden llegar hasta un tercio del total de la energía. Entre ellas, ordenadas de acuerdo con el potencial de ahorro que presentan y la facilidad de implantación, destacan las 4, 5 y 1.

6. Relación de este estudio con el análisis térmico-lumínico

La configuración física de la piel de los edificios tiene una repercusión directa sobre la demanda de calefacción, refrigeración e iluminación de los espacios directamente relacionados con ella, tales como las salas en un edificio particionado o bien plantas enteras en un edificio sin particiones. Y la experiencia indica que esta demanda, en la escala de la totalidad del edificio y sumada al resto de usos energéticos, representa casi dos tercios de la energía o las emisiones de efecto invernadero del ciclo de vida.



Por ello, y en forma tanto paralela como coordinada con el estudio de ACV de los materiales de la fachada, se ha llevado a cabo otro estudio del cerramiento en cuanto a los efectos lumínicos y térmicos que puede tener sobre los edificios a los cuales se aplica. Este estudio, desarrollado por Ingenieros Consultores Grupo JG, ha permitido determinar la demanda de climatización e iluminación para varias configuraciones de la fachada FB720 (también las MCM y FPC) bajo la hipótesis de localizaciones en distintos climas de España y para las diferentes orientaciones cardinales.

Cabe tener presente que ambos estudios se centran sobre objetos diferentes: una piel conectada a un espacio interior hipotético con el cual interactúa, en el caso del estudio térmico-lumínico, y un elemento bidimensional de cerramiento conectado con un edificio hipotético sólo a efectos constructivos, en el caso del ACV. De tal forma, los resultados a que se llega en uno y otro estudio no son comparables directamente ni se pueden sumar.

Pero para tener una visión ambiental completa cabe relacionarlos, analizar los resultados de ambos estudios de manera conjunta. Esto permite, por ejemplo, verificar que las mejoras obtenidas en un análisis a partir de cambios en la configuración se verifiquen en el otro análisis. Si así no fuera el diseño de la fachada podría ser contradictorio.

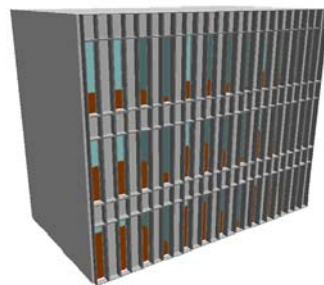
La explicación completa de las diferentes configuraciones de las fachadas FB720, MCM y FPC consideradas, de los espacios hipotéticos sobre los que se las situó, de las asunciones en cuanto a condiciones de confort, cargas térmicas e intercambios energéticos, de la metodología de cálculo y análisis de resultados y de las particularidades de las simulaciones energéticas realizadas puede encontrarse en la documentación correspondiente al estudio térmico-lumínico. No obstante y a efectos de poder comprender fácilmente el análisis realizado, algunos de los resultados a los que se ha llegado y la relación con el estudio de ACV a continuación se realiza una síntesis de los aspectos más destacables.

El estudio se ha centrado en la estimación de la demanda de refrigeración y calefacción de una zona interior afectada por el sistema de fachada así como la estimación del consumo eléctrico asociado a las luminarias. La demanda térmica se ha calculado mediante la aplicación informática TAS, mientras que para el estudio lumínico se ha empleado eQUEST. El tipo de simulación realizada es dinámica y determina el comportamiento térmico estacional del edificio. Se han creado los diferentes modelos 3D reproduciendo las características arquitectónicas básicas, especificando la orientación y la localización geográfica del sistema de fachada. Con este modelo se realiza el cálculo de las proyecciones de sombras sobre el edificio para los 365 días del año y se exporta toda la información del modelo 3D al programa de simulación, donde se define el resto de parámetros (características de los cerramientos, ocupación, otras cargas internas, agenda de uso, condiciones de confort, datos climáticos, etc.).

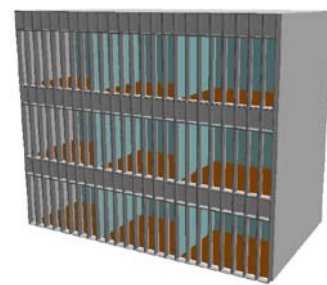
El modelo lumínico consta de un solo espacio, con las dimensiones vidriadas correspondientes y la orientación según el modelo evaluado. El modelo térmico consta de tres plantas y seis espacios en cada una de ellas, aunque solamente se evalúan los resultados de una de las zonas, rodeada de espacios acondicionados.



Planta del modelo usado en TAS



Modelo 37% vidriado



Modelo 75% vidriado

Se trata de un espacio cúbico de 4,8 m de frente, 4 m de profundidad y 4 m de altura. El modelo se ha localizado en tres ciudades representativas de la diversidad climática española: Barcelona, Almería y Burgos. En cuanto a cargas internas y condiciones interiores se han considerado los escenarios alto (oficinas) y bajo (residencial), representando cambios en densidad de ocupación, carga sensible y latente, potencias de alumbrado y equipos e intensidad de ventilación. Los horarios de funcionamiento del edificio son de 8:00h a 20:00h en oficinas y todo el día en viviendas. A continuación se exponen los valores de transmitancia térmica U y de factor solar FS utilizados.

	U [W/m²K]	FS [%]
Fachada opaca	0,36	-
Marco	2,67	-
Vidrio I	1,39	0,34
Vidrio II	2,69	Variable
Vidrio III	1,50	Variable

MCM

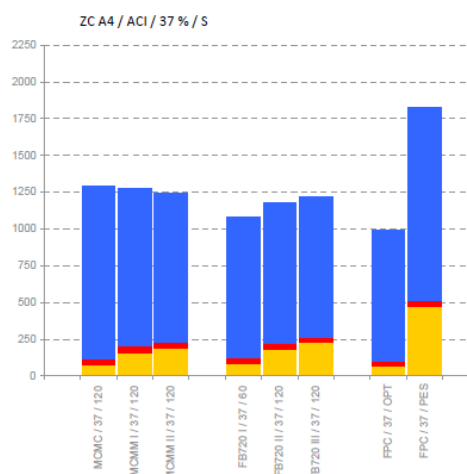
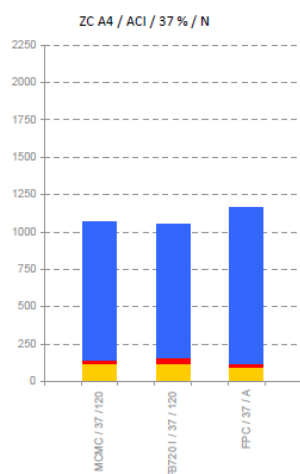
	U [W/m²K]	FS [%]
Fachada opaca	0,40	-
Vidrio	1,73	0,54
Marco	2,75	-

FPC

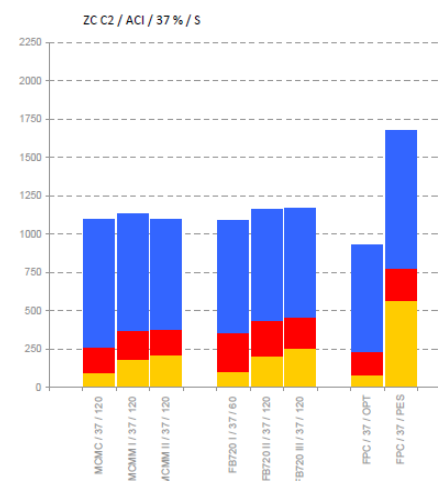
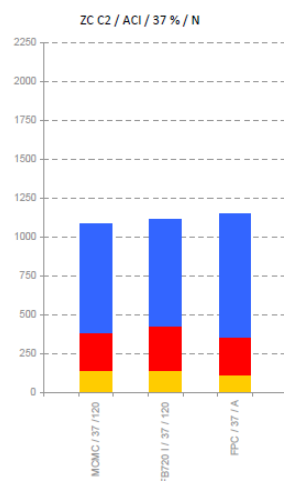
	U [W/m²K]	FS [%]
Fachada opaca	0,36	-
Marco	2,67	-
Vidrio I	1,39	0,34
Vidrio II	2,69	Variable
Vidrio III	1,50	Variable

FB 720

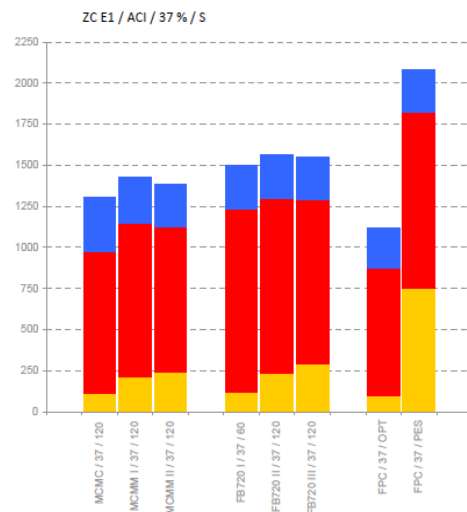
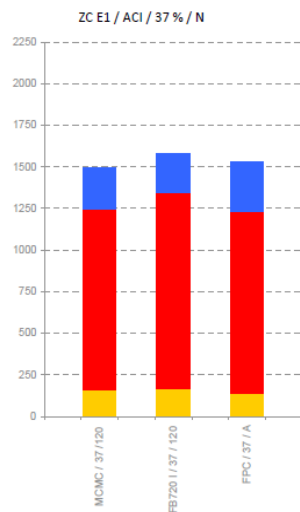
Se reproduce una síntesis de resultados, con valores expresados en KWh/m². El amarillo representa el consumo de iluminación, el rojo demanda de calefacción y el azul demanda de refrigeración. Todas las fachadas tienen un 37% transparente excepto cuando se indica lo contrario (se omiten las 75% vidriadas, con valores más altos de demanda).



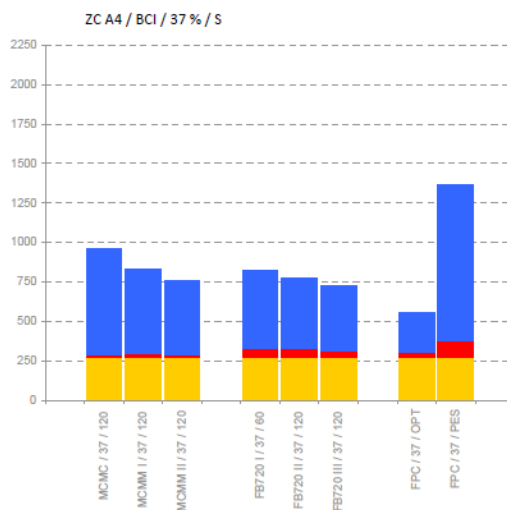
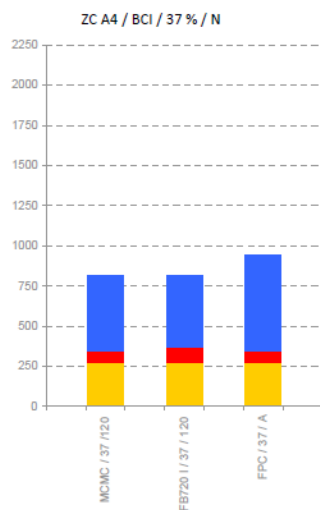
Almería, alta carga interna, Norte / Sur



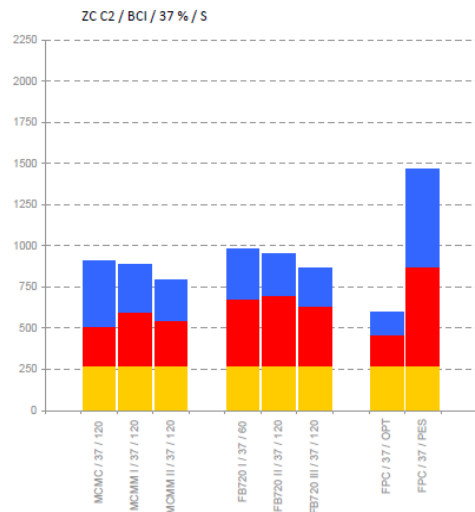
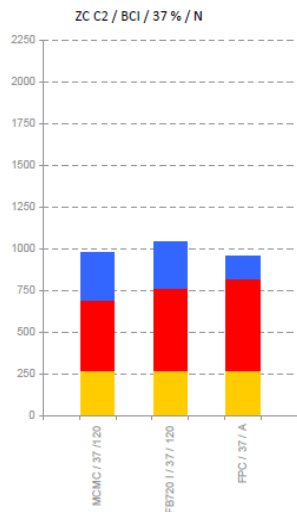
Barcelona, alta carga interna, Norte / Sur



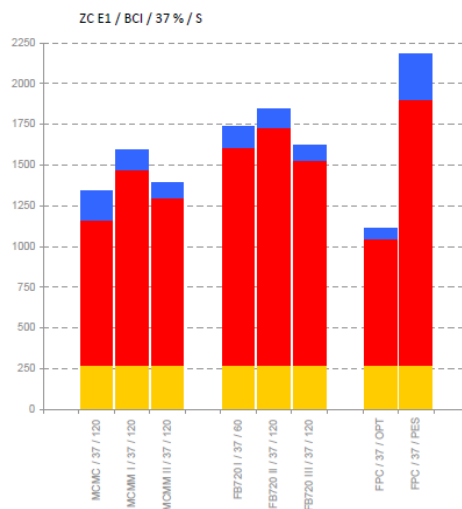
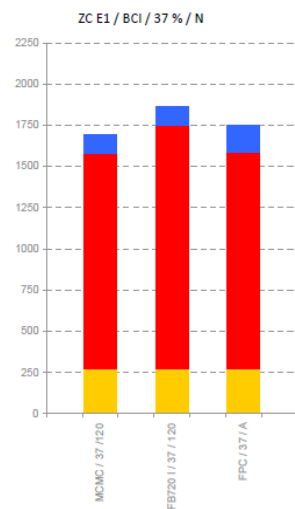
Burgos, alta carga interna, Norte / Sur



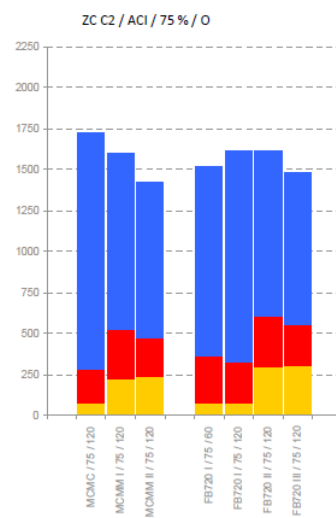
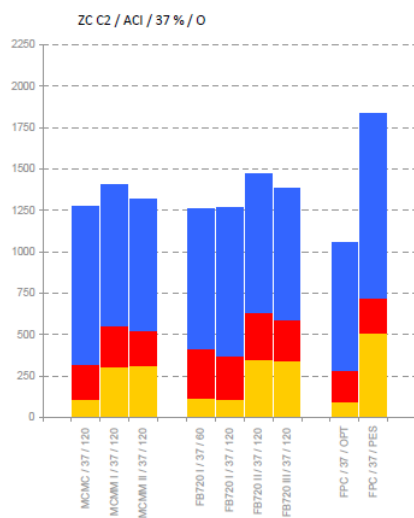
Almería, baja carga interna, Norte / Sur



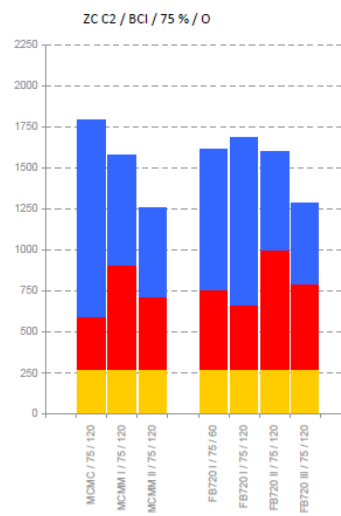
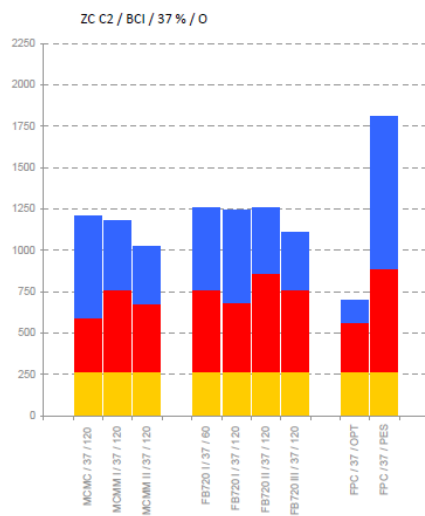
Barcelona, baja carga interna, Norte / Sur



Burgos, baja carga interna, Norte / Sur



Barcelona, alta carga interna, Oeste, 37% hueco / 75% hueco



Barcelona, baja carga interna, Oeste, 37% hueco / 75% hueco

En la evaluación térmico-lumínica los resultados las diferencias entre los distintos tipos de fachadas FB720 y entre éstos y las fachadas MCM y FPC no son tan notorias como en la evaluación de ACV, al menos no si se descartan algunos casos excepcionales con valores muy altos. Dependiendo de la zona geográfica, la carga interna alta o baja y la orientación del cerramiento en ocasiones la mejor alternativa es alguna de las configuraciones FB720, o bien MCM, o bien FPC. Las diferencias respecto de la óptima, cuando ésta es la FPC y la que le sigue la FB720 o la MCM, son importantes (entre un 30% y un 50%) presumiblemente por el efecto de la amortiguación del cambio de temperaturas interiores gracias a la inercia térmica que supone su mayor masa.

Con alta carga interna en orientación Norte para Almería, Barcelona y Burgos (tres primeras gráficas, lado izquierdo) no hay grandes diferencias entre las tres fachadas. En cambio con la misma carga y zonas pero con orientación Sur donde ya hay intenso asoleo (tres primeras gráficas, lado izquierdo) la menor demanda la presenta la FPC.

Con baja carga interna en orientación Norte para Almería, Barcelona y Burgos (tres segundas gráficas, lado izquierdo) la situación se repite respecto de lo ocurrido con cargas altas, es decir no hay grandes diferencias entre los tres tipos de fachada. En cambio con la misma carga y zonas pero con orientación Sur donde ya hay intenso asoleo (tres primeras gráficas, lado izquierdo) la menor demanda la presenta la FPC seguida a veces por la MCM y a veces por la FPC.

Con alta y baja carga interna, en Barcelona, con orientación Oeste y 37% vidriado (últimas dos gráficas, lado izquierdo) la mejor opción vuelve a ser la FPC seguida en el primer caso por la MCM y en el segundo por la FB720. Con las mismas condiciones pero 75% vidriado la demanda más baja es casi igual para las mejores opciones de MCM y FB720. Cabe decir que en las orientaciones Norte y Sur, no representadas en los gráficos para las mismas características de carga, ubicación, orientación y 75% de superficie vidriada la menor demanda la presenta la FB720.

A partir de estos resultados de demanda de calefacción y refrigeración así como de consumo de iluminación de los distintos tipos de fachada, localizaciones geográficas, cargas térmicas interiores, orientaciones y porcentaje de superficies vidriadas, se ha realizado una estimación de los consumos energéticos (energía final que emplean las instalaciones, que depende de los rendimientos de los equipos) y de las emisiones de dióxido de carbono de esa energía final (que dependen de la fuente energética empleada para la generación de calor, frío y luz) que causan efecto invernadero en la atmósfera.

Desde el punto de vista metodológico y para esta conversión de las demandas de energía en consumos energéticos y emisiones de CO₂ asociadas, cabe determinar las siguientes cuestiones:

-Selección de variantes de fachadas: a efectos de facilitar la lectura y comprensión de los valores a los que se ha llegado, así como de las conclusiones, para cada localización, carga térmica interna y orientación se presentan la alternativa de cada fachada que menor demanda energética total presenta, con 37% y 75% de superficie vidriada. Cabe señalar que en el caso de la superficie vidriada mayor, que es la que predomina en edificios con muro cortina, no se tiene en cuenta el sistema constructivo de fachada FPC (fachada pesada convencional) ya que por su naturaleza constructiva no es de aplicación habitual en este tipo de cerramientos.

-Sistemas de climatización de referencia y su eficiencia: En el campo de los sistemas de instalaciones de climatización existen muchas variables que intervienen en su eficiencia final (tipo de fuente energética, energía más o menos renovable, exigencias normativas, maquinaria de generación de calor y frío, tipos de distribución y emisión, recuperación o no de energía del aire exhausto, programación y regulación del sistema, gestión de las instalaciones, etc.). Debido a que la consideración de las instalaciones de los edificios en los que pudiera instalarse la fachada FB720 no es objeto de este estudio, se ha decidido emplear, para todos los sistemas de fachada considerados, unos mismos sistemas de instalaciones de referencia. Y para ello se ha recurrido al 'Documento de condiciones de aceptación de procedimientos alternativos. Programas alternativos a LIDER y CALENER' del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía, donde se establecen las condiciones estándar de sistemas y rendimientos energéticos (relación entre la energía de red demandada y la energía útil aportada al edificio). La determinación de sistemas y rendimientos empleadas en los cálculos de consumo de calefacción y refrigeración pueden verse en la tabla siguiente, extraída del documento mencionado.

Tabla 8.13 Sistemas de Climatización para edificios no residenciales

Elemento	Concepto	Edificio objeto	Edificio referencia	Comentarios
	Sistema de calefacción	Tal cual en proyecto	Sistema de generación térmica mediante combustible gas natural con rendimiento medio estacional de 0.75	El sistema deberá suministrar la demanda de calor más la ventilación, para cada zona
	Sistema de refrigeración	Tal cual en proyecto	Sistema eléctrico con rendimiento medio estacional de 2.75	El sistema deberá suministrar la demanda de frío más la ventilación, para cada zona

-Coeficientes de paso entre KWh de gas o eléctricos a emisiones de CO₂: Este es otro tema en el que habría muchas consideraciones a realizar, ya que es objeto de discusión frecuente en el sector. Existen diversas fuentes de información (Red Eléctrica Española, IDAE, organismos autonómicos de energía, empresas suministradoras de energía, estudios y publicaciones de centros tecnológicos, etc.). Al igual que en el caso anterior, por no ser éste un tema central en el estudio del Proyecto FB720, para el cálculo de emisiones de CO₂ derivadas del consumo energético de se ha optado por considerar los coeficientes de paso empleados por el programa oficial de certificación energética CALENER (tanto GT como VyP) a la fecha de edición de este informe. Ellos son 0,649 Kg/CO₂/KWh para electricidad y 0,204 Kg/CO₂/KWh para gas natural.

-Tipo de energía (primaria o final) que representan los indicadores: Cabe tener presente que, a diferencia del estudio de ACV presentado en los puntos 1 a 5 de este informe donde los valores expresan energía primaria, los resultados de consumo energético de calefacción, refrigeración e iluminación que se presentan a continuación expresan energía final (es decir la energía utilizada en el punto de consumo, sin contar toda la necesaria para extraer los combustibles, hacer conversiones o generación en el caso de la electricidad, y transportarla hasta los puntos de consumo).

A continuación se presentan diversas tablas con los resultados de consumo y emisiones.

BCN ALTA CARGA INTERNA				Consumo (kW)					KgCo ₂				
Orientación	% huecos	Tipo	Separacion montantes	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso
N	37	MCMC	-	327,6	253,4	245,67	826,7	124,5%	50,1	452,3	92,0	594,4	113,3%
		FB720 I	120	372,9	251,2	279,69	903,8	136,1%	57,1	448,3	94,8	600,1	114,4%
	75	FPC	Optimo	324,0	224,0	116,26	664,2	100%	49,6	399,8	75,5	524,8	100%
		MCMC	-	357,7	315,6	268,30	941,6	100%	54,7	563,3	55,8	673,9	104,3%
S	37	FB720 I	120	393,1	302,8	294,79	990,6	105,2%	60,1	540,4	57,8	658,3	
		MCMM II	-	220,9	260,3	165,70	646,9	120,1%	33,8	464,5	137,8	636,1	118,2%
		FB720 III	120	272,7	257,9	204,55	735,1	136,5%	41,7	460,2	164,8	666,8	
		FPC	Optimo	199,4	253,4	85,64	538,5	100%	30,5	452,3	55,6	538,4	100%
	75	MCMM II	-	224,3	313,0	168,24	705,6	100%	34,3	558,7	85,8	678,9	108,5%
		FB720 III	120	264,0	282,8	198,00	744,8	105,5%	40,4	504,7	93,4	638,4	
O	37	MCMM II	-	285,8	288,8	214,38	789,0	125,7%	43,7	515,5	200,9	760,1	
		FB 720 III	120	331,2	288,7	248,38	868,3	138,4%	50,7	515,3	219,8	785,8	
		FPC	Optimo	251,1	279,7	96,69	627,5	100%	38,4	499,2	62,8	600,4	100%
	75	MCMM II	-	310,3	346,4	232,70	889,4	100%	47,5	618,3	155,1	820,9	100%
FB 720 III		120	338,3	336,4	253,71	928,3	104,4%	51,8	600,3	195,8	847,8	103,3%	

Barcelona, alta carga interna

BCN BAJA CARGA INTERNA				Consumo (kW)					KgCo ₂				
Orientación	% huecos	Tipo	Separacion montantes	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso
N	37	MCMC	-	566,3	104,0	270,49	940,7	107,2%	86,6	185,6	175,5	447,8	127,8%
		FB720 I	120	657,8	101,0	270,49	1029,3	117,3%	100,6	180,3	175,5	456,5	130,3%
		FPC	Optimo	556,9	50,1	270,49	877,6	100%	85,2	89,5	175,5	350,3	100%
	75	MCMC	-	615,1	161,0	270,49	1046,6	100%	94,1	287,3	175,5	556,9	103,6%
		FB720 I	120	686,0	148,3	270,49	1104,7	105,6%	105,0	264,6	175,5	545,1	
S	37	MCMM II	-	367,4	90,7	270,49	728,5	126,9%	56,2	161,8	175,5	393,6	130,2%
		FB720 I	120	427,9	124,7	270,49	823,1	143,4%	65,5	222,5	175,5	463,6	
		FPC	Optimo	254,2	49,3	270,49	573,9	100%	38,9	87,9	175,5	302,3	100%
	75	MCMC	-	289,9	275,4	270,49	835,8	100%	44,4	491,6	175,5	711,5	
		FB720 III	120	458,9	112,9	270,49	842,2	100,8%	70,2	201,5	175,5	447,2	
O	37	MCMC	-	431,0	223,4	270,49	924,9	129,7%	65,9	398,8	175,5	640,3	
		FB720 I	120	548,2	203,0	270,49	1021,7	143,3%	83,9	362,3	175,5	621,7	
		FPC	Optimo	394,0	48,5	270,49	712,9	100%	60,3	86,5	175,5	322,3	100%
	75	MCMM II	-	595,4	196,4	270,49	1062,3	100%	91,1	350,5	175,5	617,2	102,1%
		FB 720 III	120	698,4	180,4	270,49	1149,3	108,2%	106,8	322,0	175,5	604,4	100%

Barcelona, baja carga interna

ALM ALTA CARGA INTERNA				Consumo (kW)					KgCo ₂				
Orientación	% huecos	Tipo	Separacion montantes	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso
N	37	MCMC	-	34,4	335,6	116,13	486,1	100%	5,3	598,9	75,4	679,5	101,4%
		FB720 I	120	43,1	327,6	121,75	492,5	101,3%	6,6	584,8	79,0	670,4	100%
		FPC	-	35,1	379,4	94,20	508,6	104,6%	5,4	677,1	61,1	743,6	110,9%
	75	MCMC	-	44,9	409,6	67,57	522,1	102,2%	6,9	731,1	43,9	781,8	104,7%
		FB720 I	120	52,0	388,4	70,24	510,6	100%	7,9	693,3	45,6	746,8	100%
S	37	MCMC	-	50,0	426,9	77,63	554,5	128,6%	7,6	761,9	50,4	819,9	
		FB720 I	60	49,3	348,8	86,12	484,2	112,4%	7,5	622,6	55,9	686,0	109,0%
		FPC	Optimo	37,5	324,0	69,50	431,0	100%	5,7	578,3	45,1	629,1	100%
	75	MCMM II	-	64,4	489,7	110,20	664,3	115,6%	9,9	874,1	71,5	955,4	116,0%
		FB720 I	60	60,9	452,3	61,55	574,7	100%	9,3	807,3	39,9	856,5	

Almería, alta carga interna

ALM BAJA CARGA INTERNA				Consumo (kW)					KgCo ₂				
Orientación	% huecos	Tipo	Separacion montantes	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso
N	37	MCMC	-	98,7	172,0	270,49	541,2	100%	15,1	307,0	175,5	497,7	102,2%
		FB720 I	120	128,6	163,4	270,49	562,5	103,9%	19,7	291,6	175,5	486,8	100%
		FPC	-	95,6	217,5	270,49	583,6	107,8%	14,6	388,1	175,5	578,3	118,8%
	75	MCMC	-	112,2	245,3	270,49	627,9	100%	17,2	437,7	175,5	630,4	106,1%
		FB720 I	120	134,5	222,9	270,49	627,9	100%	20,6	397,8	175,5	594,0	100%
S	37	MCMM II	-	28,1	170,1	270,49	468,8	114,4%	4,3	303,7	175,5	483,5	139,3%
		FB720 III	120	58,7	150,7	270,49	479,9	117,1%	9,0	269,0	175,5	453,5	130,7%
		FPC	Optimo	47,3	92,0	270,49	409,8	100%	7,2	164,2	175,5	347,0	100%
	75	MCMM II	-	19,5	285,3	270,49	575,2	109,2%	3,0	509,1	175,5	687,7	110,3%
		FB720 III	120	42,9	213,4	270,49	526,8	100%	6,6	380,8	175,5	563,0	100%

Almería, baja carga interna

BUR ALTA CARGA INTERNA				Consumo (kW)					KgCo ₂				
Orientación	% huecos	Tipo	Separación montantes	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso
N	37	MCMC	-	1449,1	89,0	162,03	1700,1	100%	221,7	158,9	105,2	485,8	100%
		FB720 I	120	1564,1	87,3	170,00	1821,3	107,1%	239,3	155,7	110,3	505,4	104,0%
	75	MCMC	-	1455,7	108,1	138,67	1702,5	100,1%	222,7	193,0	90,0	505,7	104,1%
		FB720 I	120	1516,8	126,4	101,47	1744,7	100%	232,1	225,5	65,9	523,5	100%
S	37	MCMC	-	1606,7	117,4	108,15	1832,2	105,0%	245,8	209,5	70,2	525,5	100,4%
	75	MCMC	-	1149,8	122,3	109,49	1381,6	113,1%	175,9	218,3	71,1	465,2	123,0%
		FB720 I	60	1479,6	97,9	120,53	1698,0	139,0%	226,4	174,7	78,2	479,3	126,7%
	75	FPC	Optimo	1036,1	87,3	98,37	1221,8	100%	158,5	155,8	63,8	378,2	100%
		MCMC	-	1051,7	215,1	80,82	1347,7	100%	160,9	383,9	52,5	597,3	
		FB720 III	120	1280,2	103,3	167,75	1551,3	115,1%	195,9	184,4	108,9	489,1	101,4%

Burgos, alta carga interna

BUR BAJA CARGA INTERNA				Consumo (kW)					KgCo ₂				
Orientación	% huecos	Tipo	Separación montantes	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso	Calefacción	Refrigeración	Iluminación	TOTAL	% respecto al mejor caso
N	37	MCMC	-	1744,9	42,1	270,49	2057,5	100%	267,0	75,1	175,5	517,6	100%
		FB720 I	120	1973,9	41,1	270,49	2285,5	111,1%	302,0	73,3	175,5	550,8	106,4%
	75	FPC	-	1751,1	59,5	270,49	2081,1	101,1%	267,9	106,2	175,5	549,7	106,2%
		MCMC	-	1949,4	78,5	270,49	2298,4	100%	298,3	140,1	175,5	613,9	100%
S	37	FB720 I	120	2130,8	69,4	270,49	2470,7	107,5%	326,0	123,8	175,5	625,3	101,9%
	75	MCMC	-	1189,9	65,0	270,49	1525,4	114,9%	182,1	116,0	175,5	473,6	
		FB720 III	120	1678,5	32,9	270,49	1981,8	149,3%	256,8	58,7	175,5	491,0	129,9%
	75	FPC	Optimo	1032,1	24,9	270,49	1327,5	100%	157,9	44,5	175,5	377,9	100%
		MCMC	-	1143,5	155,5	270,49	1569,5	100%	175,0	277,5	175,5	628,0	120,8%
		FB720 III	120	1708,0	46,6	270,49	2025,1	129,0%	261,3	83,2	175,5	520,1	100%

Burgos, baja carga interna

En algunos casos el orden de menor a mayor presentado por las distintas opciones de fachada respecto de sus demandas de energía se altera cuando se calculan los consumos energéticos y las emisiones de CO₂. La opción que presenta la demanda más baja puede no ser la que menor consumo energético tiene y la que presenta el consumo más bajo puede no ser la que menores emisiones tiene. Por ejemplo, si se consideran dos fachadas con idéntica demanda global pero diferentes proporciones de demandas parciales de calefacción, refrigeración e iluminación, éstas dejan de ser equivalentes cuando se evalúa el consumo porque los coeficientes de paso de demanda a consumo son muy diferentes. En cuanto al paso de demanda a consumo, el uso de sistemas a gas en calefacción tiene un rendimiento 0,75 mientras que el uso de sistemas a electricidad en refrigeración tiene rendimiento 2,75. Y en cuanto al paso de consumo a emisiones, en los usos de gas supone multiplicarlo por 0,204 KgCO₂/KWh mientras que en los usos de electricidad supone multiplicarlo por 0,649 KgCO₂/KWh.

Aunque la variedad de localizaciones, configuraciones de fachada, cargas térmicas interiores, orientaciones y porcentaje de superficies vidriadas hace difícil llegar a conclusiones absolutas, en general puede decirse que la fachada FB720 obtiene en muchos casos ligeras mejoras o bien se sitúa en un nivel de consumo global de energía y emisiones de CO₂ muy próximo al de la otra alternativa ligera, la fachada MCM. Cuando la comparación se hace con la fachada pesada FPC en las orientaciones con asoleo intenso en la demanda energética interviene el factor de una mayor masa térmica y, en consecuencia, la fachada FB720 presenta valores de consumo y emisiones superiores.

Los casos en que la FB720 obtiene un mejor resultado que el resto de alternativas son: Barcelona, baja carga interna, 75% vidriada; orientación O (en emisiones de CO₂, entre un 0% y un 2% mejor que el resto); Almería, alta carga interna, 75% vidriada, orientación S

(en energía, un 15% mejor que la MCM), Almería, alta carga interna, 37% y 75% vidriada, orientación N (en emisiones de CO₂, entre un 5% y un 10% mejor que el resto); Almería, baja carga interna, 75% vidriada, orientación S (en energía, un 9% mejor que la MCM); Almería, baja carga interna, 37% y 75% vidriada, orientación N (en emisiones de CO₂, entre un 2% y un 18% mejor que el resto); Almería, baja carga interna, 75% vidriada, orientación S (en emisiones de CO₂, un 10% mejor que la MCM); Burgos, baja carga interna, 75% vidriada, orientación S (en emisiones de CO₂, un 20% mejor que la MCM).

Se puede concluir, a partir del análisis anterior, en que existen algunos casos de mejora de consumo energético de la FB720 respecto de muros cortina en orientaciones oeste, y sur tanto en climas cálidos. En cuanto a las emisiones de CO₂ y siempre respecto de muros cortina, la fachada FB720 obtiene mejoras en algunos casos en un espectro más amplio de climas (moderado, cálido y frío) y orientaciones (oeste, norte y sur). La proporción de superficie vidriada no es decisiva, ya que tanto con 37% como con 75% se constatan algunos casos de mejora, siempre respecto de los muros cortina.

Cabe aclarar que ninguno de los aspectos comentados, tampoco un hipotético aumento en el peso de los materiales de la FB720 si lo que se busca es ganar inercia térmica en el cerramiento, tiene porqué suponer ventajas o desventajas ambientales respecto de la valoración de la solución constructiva mediante un ACV, sino que puede resolverse manteniendo las disminuciones de impacto ambiental ya comentadas en otras partes de este documento en nuevos materiales o soluciones.

7. Anexos: Datos y cálculos de impactos del ciclo de vida

Equipo de Análisis de impacto ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña
Gerardo Wadel*, Pol Alonso y Joan-Lluís Zamora

*Societat Orgànica

Barcelona, diciembre de 2011